

2019 年度 学位論文（修士）

混雑時間帯における
フローコリドーの高密度運航

2020 年 1 月 24 日

首都大学東京大学院
システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
航空宇宙システム工学域 博士前期課程

18863605

深澤 悠

指導教員

武市 昇 教授

目次

1. 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 本論文の構成	2
2. 使用するデータ・計算方法	3
2.1 CARATS Open Data	3
2.2 メソ数値予報モデル (MSM) データ	4
2.3 BADA	6
2.3.1 BADA とは	6
2.3.2 Total-Energy Model とは	6
2.4 離着陸間隔の設定	7
2.4.1 RECAT	7
2.4.2 フローコリドーへの適用	9
3. フローコリドーにおける最適軌道の解析	11
3.1 フローコリドーの経路設定	11
3.2 数値シミュレーションを用いた軌道最適化	13
3.3 運航コスト曲線の作成	15
4. 交通流への適用	17
4.1 混雑時間の設定	17
4.2 高密度交通流の形成	18
4.2.1 飛行便数の設定	18
4.2.2 交通流の形成	19
4.2.3 飛行時間の最適化	20
4.3 結果	22
4.3.1 比較対象：総コスト最小交通流	22
4.3.2 結果	23
4.3.3 評価	29
5. 結言	32
参考文献	33
謝辞	34

記号表

D	: 抗力	[N]
h	: 高度	[m]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
m	: 機体質量	[kg]
t	: 時刻	[s]
Thr	: 推力	[N]
V_{CAS}	: 較正対気速度	[m/s]
V_{TAS}	: 真対気速度	[m/s]
γ	: 経路角	[rad]

1. 緒言

1.1 研究背景

今日の航空交通においては、特定の混雑空港間の交通量の割合が高く、これらの経路上では多くの航空機がほぼ同一の経路上を同一の方位に向かって飛行する。また現在の管制では管制官の管制により迂回などの指示を出すことにより、安全な運航が達成されているが、これは必ずしも効率的な運航とはいえない。そこで将来的には管制官の指示なしで、航空機が互いに監視することで、自律的に安全な間隔の保持を行う自律間隔維持^[1]が可能になるとみられている。自律間隔維持により、安全に高密度運航が行うことができる。自律間隔維持には機上アビオニクスである ADS-B(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast^[2])を用いた ASAS (Airborne Separation Assistance System)^[3]により可能となる。ただし、自律間隔維持は ASAS を搭載する航空機のみでしか実現することが出来ない。

そこで ASAS の装備状況により空域を分離するフローコリドー(Flow Corridor)^{[4][5]}が研究されている。フローコリドーは高需要都市間を接続する細長い空域をして導入が検討されている。フローコリドーの導入により、フローコリドー内を飛行する航空機は、自律間隔維持の機能により管制官の介入を要することなく安全に、高密度運航を行うことができる。そしてほぼ最適な軌道を飛行し、運航コストを削減することができる。一方、フローコリドーの外部は従来通りの航空管制が行われるので、空域全体としては安全性を損なうことなく交通容量を拡大することが可能となると考えられている。しかしフローコリドーは利用しない便にとっては巨大な障害物となる。そこで時間帯を限定しフローコリドーを限定的に運用することで、フローコリドーを利用しない便に障害となる時間を減らせると考えられる。また混雑には偏りが存在し、朝夕のラッシュ時には交通需要は高まる。そこで本研究では、フローコリドーの便益を最大限に得るために混雑時間帯に限定して運用することを想定する。

またフローコリドーでは飛行中に ASAS を用いてほとんど燃料消費量を増やさずに、自由に追い越しが可能となる。しかし離着陸時には追い越しを行うことができないため、離着陸時には適切な間隔保持が必要である。また機種ごとに、運航コストが最小となる最適軌道は異なりその機種ごとに最適な飛行時間が異なる。そこで最適飛行時間のままでは、高密度運航もしくは離着陸間隔の維持どちらかが損なわれてしまう。そこで適切な離着陸間隔を満たしながら高密度運航するためには、最適な飛行時間からの、飛行時間の調整が必要となる。ただし、飛行時間の調整をすればするほどコストは増加するため、コストの増加は抑える必要がある。

1.2 研究目的

本研究では、混雑時間帯における福岡発羽田着フローコリドーで、離着陸間隔を確保しつつ、運航コストを抑えながら、飛行便数を増やすことを目指す。そこで、各便の飛行時間の最適化を行う。また、この試みを行っても、フローコリドーの便益があるかどうかを、先行研究と運航コストを比較することにより、検証を行う。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めて5章から構成される。

第2章では、シミュレーションに用いた各種データと、計算方法に関する説明を行う。

第3章では、最適飛行シミュレーションを行うことで福岡発羽田経路におけるフローコリドー空域の決定を行う。

第4章では、混雑時の交通流を考えた際、離着陸時の安全間隔を満たしながら、運航コストを抑えつつ、できるだけ多くの便を飛行させることを目指すシミュレーション方法の説明および結果の考察を行う。

第5章では、これまでの章から得られた結果を総括し、結論を述べた。

2. 使用するデータ・計算方法

2.1 CARATS Open Data

CARATS Open Data^[6]とは、国土交通省が提供する 2012 年度から 2017 年度（2020 年 1 月時点）の奇数月の 1 週間における、約 82 万便の航跡データである。ただし 2017 年度から、奇数月に限らず毎月のデータが公開されている。データはレーダーデータと ADS-C データから構成される。対象範囲は日本が管轄を行う福岡飛行情報区（FIR:Flight Information Region）である。対象便は計器飛行方式による定期便のみであり、軍用機や自家用機などは対象外である。データ形式は約 10 秒間隔となっており、時系列の CSV 形式で与えられる。本研究では、福岡空港や羽田空港周辺のデータを離着陸間隔の設定に用いた。また、最適化計算で得られた結果の運航コストとの比較に用いた。例として、CARATS Open Data のある一日における福岡発羽田着便の飛行経路を描いた様子を Fig. 2-1 に示す。

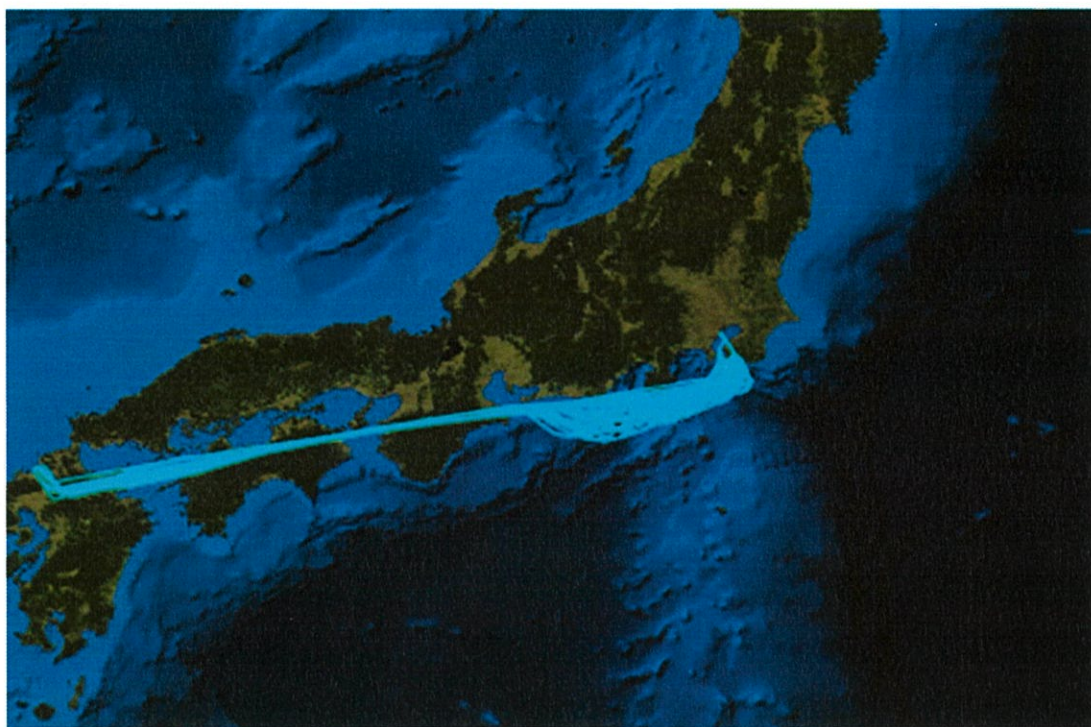


Fig. 2-1 2016 年 11 月 11 日における福岡発羽田着便の飛行経路

2.2 メソ数値予報モデル（MSM）データ

メソ数値予報モデル(MSM : Meso Scale Model)とは，気象庁が提供する格子間隔 5 [km]メッシュの数値予報モデルである． MSM の概要を Table 2-1 に示した． また例として 2015 年 5 月 11 日における気温情報を Fig. 2-2 に示した． なお Table 2-1 には予報時間とあるが，本研究では，最新予報値のみを使用し，空間的および時間的に線形補間を行うことで得た年間平均風を用いた．

Table 2-1 MSM の概要

要素	各気圧面 (1000hPa・975hPa・950hPa・925hPa・900hPa・850hPa・800hPa・700hPa・600hPa・500hPa・400hPa・300hPa) における 高度，風（東西成分と南北成分），気温，上昇流，相対湿度
初期値	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC（1日8回）
予報時間	39 時間 3 時間間隔
データ形式	国際気象通報式 FM92 GRIB 二進形式格子点資料気象通報式(第2版) ※略称：GRIB2
配信領域	北緯 22.4 度～47.6 度，東経 120 度～150 度
格子系	等緯度等経度： 0.1 度×0.125 度（格子数 253×241）

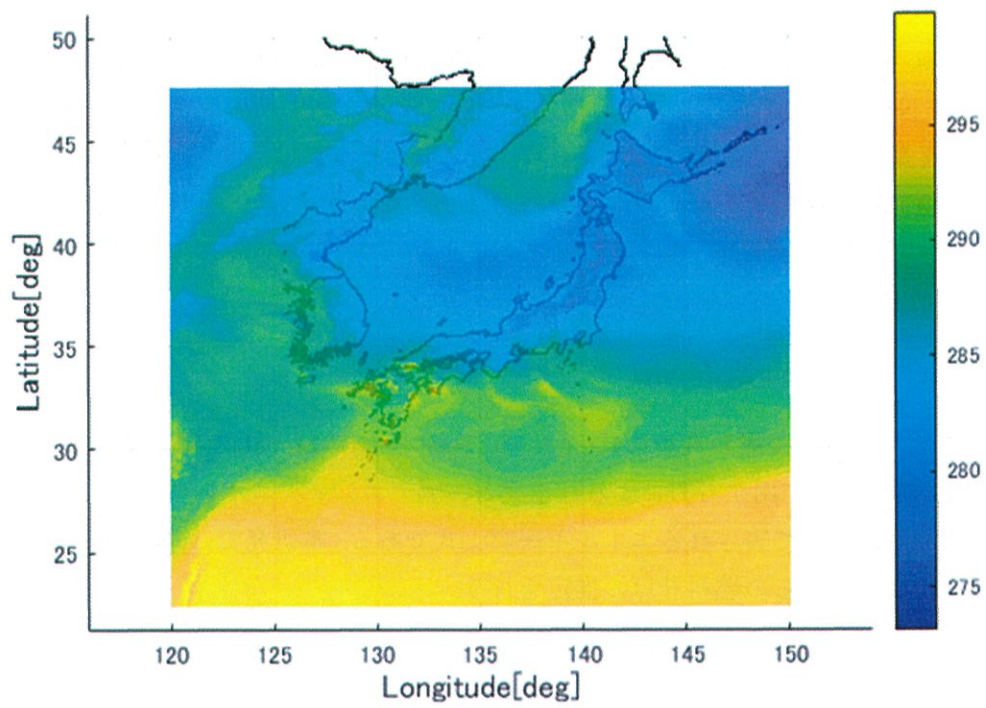


Fig. 2-2 MSM から得た気温データ [K]

2.3 BADA

2.3.1 BADA とは

BADA(Base of Aircraft Data)^[7]とは、EUROCONTROL (The European Organisation for the Safety of Air Navigation)が公開している機体モデルである。399 種の航空機の性能データが存在し、様々な機体を扱うことが可能である。取り扱うデータは、推力、抗力などの空力計算や燃料流量計算に使用するモデルおよびパラメータである。

2.3.2 Total-Energy Model とは

本研究では、燃料消費量の推定に式(2.1)の Total-Energy Model を用いる。Total-Energy Model とは、航空機に作用する力による仕事率と、ポテンシャルエネルギーおよび運動エネルギーの増加率によって表されるエネルギー収支式である。本研究では、Total-Energy Model を用いて、初期重量からの燃料計算の推定を行う。

$$(Thr - D)V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (2.1)$$

2.4 離着陸間隔の設定

2.4.1 RECAT

航空機が飛行する際に、左右の翼端から後方に一對の向きが異なる渦である後方乱気流が生じる。この乱気流に突入すると、大型航空機であっても墜落や破損等事故の可能性がある、非常に危険である^[8]。そこで航空機の離着陸の際には、安全な運航を確保するために適切な間隔を設定する必要がある。先行機が生成した後方乱気流の強さに加えて、後続機が許容可能な強さも後続機の質量によって異なる。そのため、航空機を重量により区分し、先行機と後行機の飛行機区分の組み合わせに応じ最低離隔間隔を設定し、間隔を保つように交通制御が行われている。特に混雑する空港における離着陸機では、多数の航空機が空港滑走路を介して同一経路上を飛行することから、最低離陸間隔は空港の滑走路処理容量と密接な関係がある。そこで、安全水準を維持した上で、滑走路処理容量を増やすことを目的として、航空機区分とそれに対応した最低離隔間隔を見直す RECAT(Recategorization)の導入が進んでいる。現在、初期段階として航空機区分を4区分から6～7区分に細分化することにより最低離隔間隔の短縮を図る RECAT-1 が進められている。基準の設定には重量に加え、翼幅も使用している。なお本研究では、今後予定される ICAO の基準改定案に基づくとしている^[9] RECAT-DUBAI^[10]を用いた。RECAT-DUBAI での航空機の区分は Table 2-2 のような7種類に分けられており、Table 2-4 にその航空機における満たすべき離着陸間隔を示す。大型機のあとに着陸する小型機はより大きな間隔を維持しなければならないことがわかる。また、本研究で用いる3機種の航空機における満たすべき離着陸間隔を Table 2-4 に示す。3機種には、運航頻度の高い大型ジェット旅客機、中型ジェット旅客機、小型ジェット旅客機を使用する。

Table 2-2 RECAT-DUBAI の航空機区分

CAT	最大離陸重量 M [kg]	翼幅 s [m]	今回採用する機種
A		$74.68 < s \leq 80$	-
B	$136,000 \leq M$	$53.34 < s \leq 74.68$	大型機
C		$38.1 < s \leq 53.34$	中型機
D		$32 < s$	小型機
E	$18,600 < M < 136,000$	$27.43 < s \leq 32$	-
F		$s \leq 27.43$	-
G	$M \leq 18,600$	-	-

Table 2-3 RECAT-DUBAI の最低離着陸間隔 [NM]

Leader	Follower						
	A	B	C	D	E	F	G
CAT-A	3	4	5	5	6	6	8
CAT-B	3	3	4	4	5	5	7
CAT-C	3	3	3	3	4	4	6
CAT-D	3	3	3	3	3	3	5
CAT-E	3	3	3	3	3	3	4
CAT-F	3	3	3	3	3	3	3
CAT-G	3	3	3	3	3	3	3

Table 2-4 RECAT- DUBAI を用いた最低離着陸間隔 [NM]

Leader	Follower		
	大型機	中型機	小型機
大型機	3	4	4
中型機, 小型機	3	3	3

2.4.2 フローコリドーへの適用

2.4.1 項で説明した RECAT をもとに、フローコリドーにおいて始点および終点に離着陸間隔の設定を行う。本研究では時間基準の間隔を設定することで、離着陸時の安全間隔を満たすようにした。なお、フローコリドー出口以後では定めた時間間隔を維持したまま、着陸するものとする。

そこで、距離基準で与えられている Table 2-4 の離着陸間隔を、距離基準から時間基準への変換を行った。変換の際には対地速度 (GS) を用いた。なお CARATS Open Dara および MSM データを用いることで、離陸直後・着陸直前の航空機における GS を求めた。例として大型機における 2015 年度における羽田空港 34L 滑走路への着陸までの GS 履歴を Fig. 2-3 に示す。

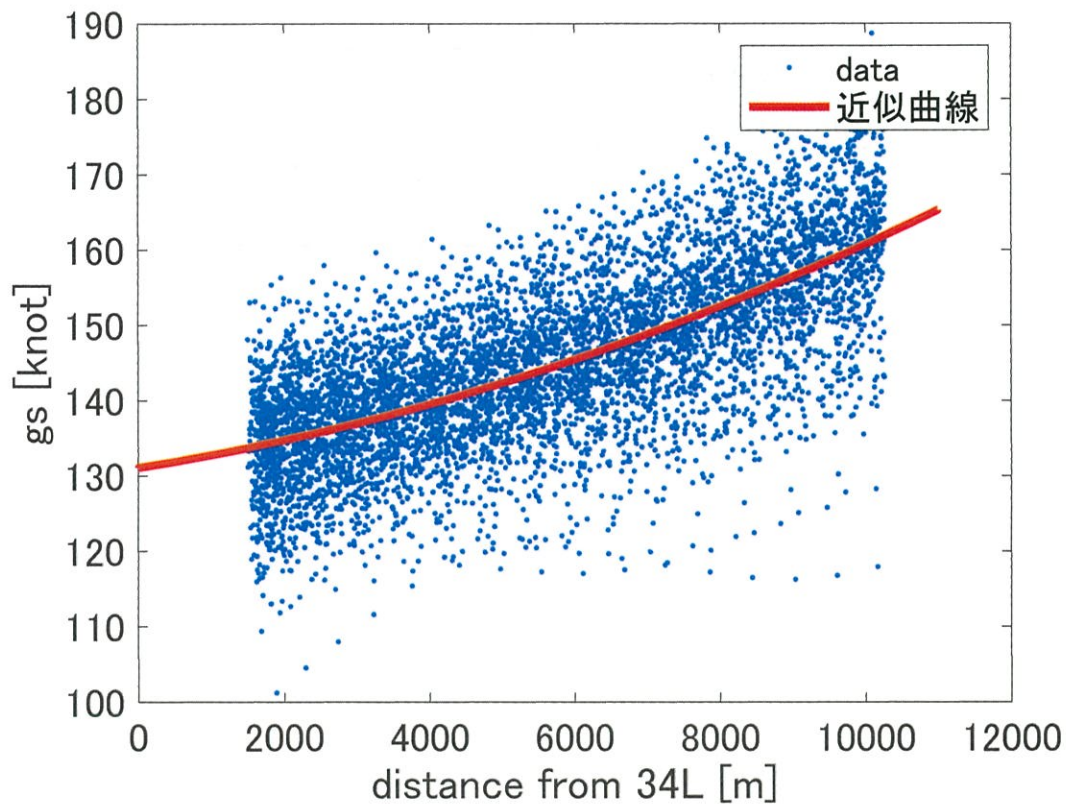


Fig. 2-3 着陸直前の GS 履歴

このGS履歴を用いて、Table 2-4 より Table 2-5, Table 2-6 を設定した。以後この値を、フローコリドー始点および終点での最低離隔間隔とし、これ以上の間隔が保持されいていればよいものとする。

Table 2-5 最低離陸間隔 [s] (時間基準)

Leader	Follower	大型機	中型機	小型機
	大型機	80.4	85.1	95.2
	中型機, 小型機	80.4	67.2	76.4

Table 2-6 最低着陸間隔 [s] (時間基準)

Leader	Follower	大型機	中型機	小型機
	大型機	79.4	104.4	98.3
	中型機, 小型機	79.4	79.7	74.7

3. フローコリドーにおける最適軌道の解析

3.1 フローコリドーの経路設定

2次元上の飛行経路は、Fig. 3-1 のようにウェイポイント YURRY から開始して標準的なRNAV 経路を設定した。ただし T09 セクターでは、ベクタリングによる過密が激しいために、フローコリドーを利用しない便の軌道を阻害しないため、T09 セクターの最も内側を通るものとした。なお、経路は、羽田空港 34 滑走路から真っすぐ延長した線との交点までとした。経路の作成に使用した 13 個の座標データを Table 3-1 に示す。

なお、フローコリドー出口において、2.4 章で説明をおこなう時間的な間隔を設けることで、フローコリドーを出た後は、その時間間隔を保ったまま安全に着陸できるものとする。



Fig. 3-1 フローコリドーにおける飛行経路

Table 3-1 フローコリドーの経路設定に使用した座標データ

	1	2	3	4	5	6	7
緯度 [deg]	33.43947	33.30666	33.35293	33.38490	33.55334	33.91623	34.13028
経度 [deg]	130.63828	130.83189	131.02111	131.15308	132.31036	133.66111	134.49036
	8	9	10	11	12	13	
緯度 [deg]	34.83278	34.86472	34.89250	34.90333	35.00528	35.07388	
経度 [deg]	137.71361	138.76278	138.92417	138.99694	139.63833	140.04754	

3.2 数値シミュレーションを用いた軌道最適化

本研究では、大型・中型・小型ジェット旅客機の代表的な機種に対して、機上実測データを参考に機体重量を3通りに変え、計9ケースに対して解析を行う。なお、機体質量に関しては、機上実測データを参考に Table 3-2 のように機種ごとに設定を行った。また質量割合とは BADA に記載されている標準質量からの割合を示す。

Table 3-2 最適化に使用する機種ごとの質量割合

機種	質量割合 [%]
大型機	100, 90, 80
中型機	85, 75, 65
小型機	100, 90, 80

高度に関する軌道は、燃料消費量と飛行時間の線形和である運航コスト式(3.1)を目的関数として最適化計算を行う。

$$Cost = \int_0^t \mu(t) dt + \frac{C_i}{79.4} t \quad (3.1)$$

$Cost[kg]$ は運航コスト、 $t[sec]$ は飛行時間、 $\mu[kg/s]$ は燃料流量、 C_i はコストインデックスである。初期・終端高度および速度は実運航データを参考に設定し、境界条件として与えた。コストインデックスは、航空会社で実際に用いられている値を参考に設定した。その値を Table 3-3 にまとめて記した。

Table 3-3 最適化に使用する初期条件およびコストインデックス

	大型機	中型機	小型機
初期高度 [ft]	10000	11500	10000
終端高度 [ft]	9000	9000	9000
初期速度(CAS[knot])	255	265	250
終端速度(CAS[knot])	240	240	240
CI [kg/s]	80	60	40

なお、速度 (CAS)・高度・加速度・および推力を制約条件として与え、高度と速度を最適化変数とする。速度と高度の初期値は、局所解に陥ることを防ぐために複数与えるマルチスタート法を採用した。本研究では、より現実の飛行状態に近づけるために上昇中と降下中の CAS はそれぞれで一定としており、巡航中はマッハ数を一定としている。その際初期速度や終端速度との差が生まれるが、この速度が移行する区間の距離を、設計した変数とした。これらシミュレーション条件を Table 3-4 にまとめた。アルゴリズムは、制約を考慮しながら、非線形関数を最小化する必要がある為、逐次二次計画法(SQP 法)を用いた9パターンの

機種に対して運航コストを目的関数として軌道最適化を行う。

Table 3-4 軌道最適化におけるシミュレーション条件

シミュレーション条件	
目的関数	運航コスト
軌道の分割数	$n = 50$
設計変数	$2n + 5$ [個] <ul style="list-style-type: none"> ・ 高度：n[個] ・ 速度：3[個]（上昇CAS，巡航<i>Mach</i>数，下降CAS） ・ 一定速度区間までの距離：2 個
不等式制約条件	速度（CAS），高度，加速度および推力

3.3 運航コスト曲線の作成

続いて、飛行時間と最小運航コストの関係を得るため、便ごとに運航コスト曲線の作成をおこなった。コスト曲線の作成には、多くの飛行時間と最小運航コストの関係が必要なため、飛行時間を拘束条件として、軌道最適化を複数回行った。また任意の飛行時間に対する最小運航コストは、2次曲線で補間を行うことで求めた。なお運航コスト曲線の例を Fig. 3-2 に示した。

また、飛行時間を現実的に飛行可能な範囲で設定する必要がある。そこで最短飛行時間 t_{min} と最大飛行時間 t_{max} を定めた。航空機の機種や初期質量割合により、最短飛行時間は異なるため、9 パターンごとの最短飛行時間を求めた。その際に 3.2 節で示したシミュレーションにおいて、目的関数を飛行時間とすることで最短飛行時間を得た。また、最大飛行時間に関しては式(3.2)のように定めた。このようにして求めた各飛行時間を Table 3-5 に示した。s

$$t_{max} = 2t_{opti} - t_{min} \quad (3.2)$$

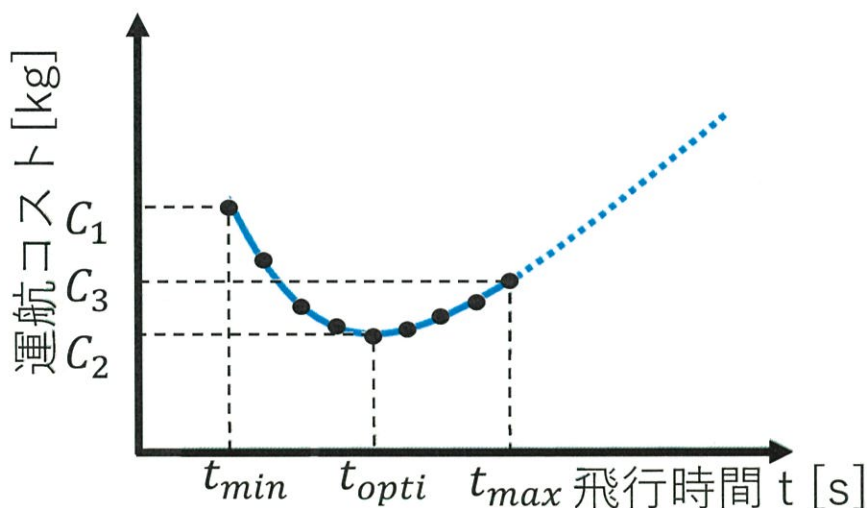


Fig. 3-2 運航コスト曲線の例

Table 3-5 航空機ごとの各飛行時間制約

機種 (質量割合)	最短飛行時間	最小コスト飛行時間	最大飛行時間
	$t_{min}[s]$	$t_{opti}[s]$	$t_{max}[s]$
大型機(100%)	3333.2	3573.1	3812.9
大型機(90%)	3342.6	3594.3	3845.9
大型機(80%)	3353.3	3600.8	3848.3
中型機(85%)	3206.1	3483.2	3760.3
中型機(75%)	3203.5	3528.6	3853.8
中型機(65%)	3211.0	3525.7	3840.5
小型機(100%)	3219.8	3508.1	3796.4
小型機(90%)	3237.7	3529.1	3820.6
小型機(80%)	3255.7	3541.2	3826.8

4. 交通流への適用

4.1 混雑時間の設定

今日の航空交通では、特に朝夕のラッシュ時に混雑が集中している。そこで本研究では、混雑時間帯に限定してフローコリドーを設定することでその便益を最大限に得ることを目指す。フローコリドーが使用される時間帯の設定には、今日の羽田空港における時間帯別の着陸便数を参考に設定を行った。2016 年度における、30 分ごとの時間帯別の西からの羽田空港着陸便数を Fig. 4-1 に示した。作成には CARATS Open Data より着陸直前のデータを使用し、それを着陸便数とした。Fig. 4-1 における赤線は、現行の一般的な着陸間隔とされている 120[s] 間隔^[11]で着陸したときの着陸便数を示しており、朝夕の 1 時間程度がまとまって超過しており、朝夕にピークが存在していることが明らかとなった。よって本研究での混雑時間帯の目安時間を 1[h] とする。

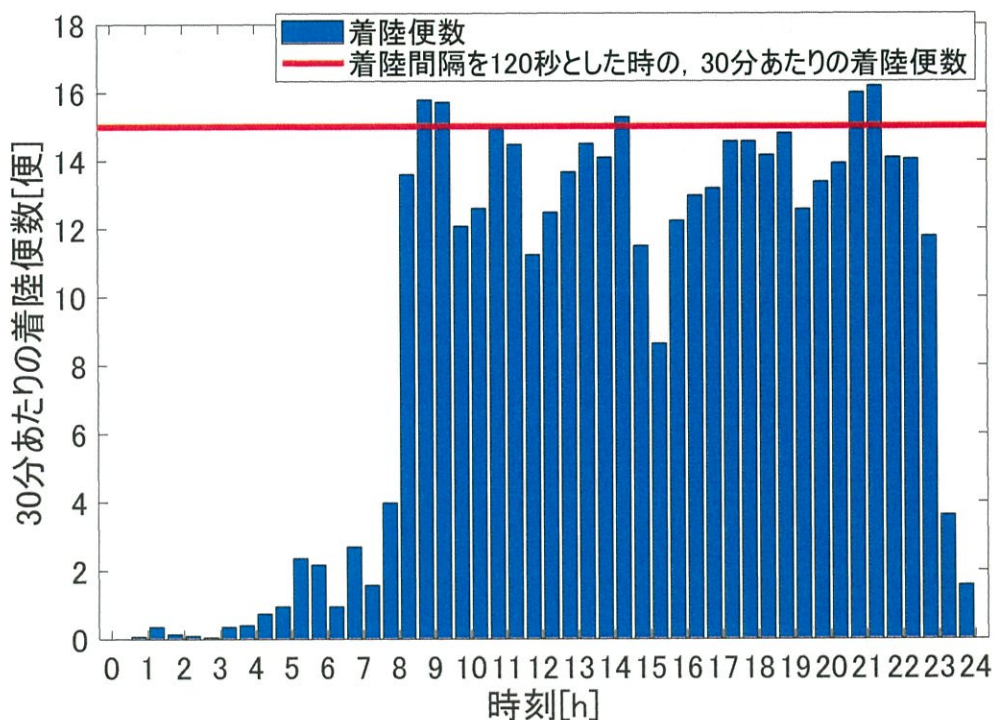


Fig. 4-1 1 年間における西からの羽田着陸平均便数

4.2 高密度交通流の形成

4.2.1 飛行便数の設定

本解析では、まず交通流における便数 n を設定することで、高密度交通流を形成する。そこで妥当な機数を設定する必要がある。そこで4.1節より混雑時間1[h]を目安とし、RECATの最低着陸の和が1[h]となる機数を設定する。また、Table 2-6より最小着陸間隔の平均値を計算すると、83.8[s]である。よって式(4.1)より、交通流の着陸間隔の合計値が1[h]となる便数を得られる。

$$n = \left(\frac{1[h]}{83.8[s]} \times 3600[s] \right) + 1 \cong 43.9[\text{便}] \quad (4.1)$$

これより、本研究では、Table 4-1のように便数の目安を定め、混雑交通流の便数として使用する。

Table 4-1 今回の解析に使用する混雑時における交通流の便数

シミュレーション条件	
交通流の便数	44 [便]

4.2.2 交通流の形成

続いて交通流の形成を行う。交通流は、「離陸間隔」と最小コスト飛行時間からの調整量である「飛行時間調整量」を与えることで形成する。まず便1（離陸順番が1番目の便）の入口時刻を0[s]とし、離陸間隔を与えることで後続便の入口時刻を決定する。続いて、各便を最小コスト飛行時間で飛ばしたときの出口時刻を決定する。そしてそこからの飛行時間調整量（最小コスト飛行時間からの調整量）を与えることで出口時刻が求まる。このように形成した交通流の模式図を Fig. 4-2 に示した。

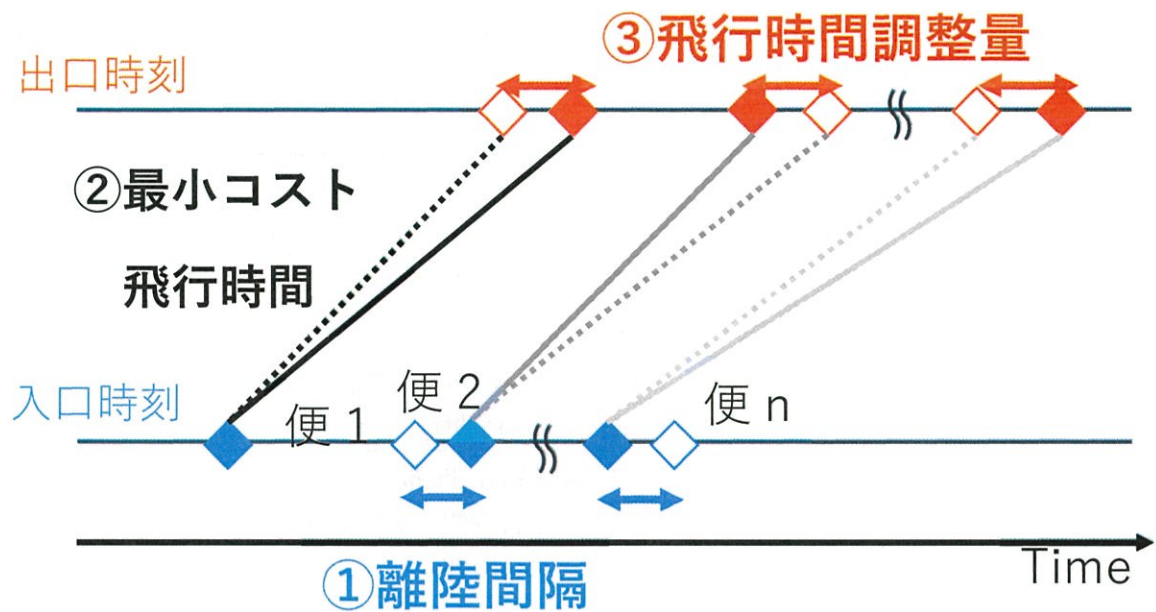


Fig. 4-2 形成した交通流

4.2.3 飛行時間の最適化

本研究では、混雑時の交通流を考えた際、離着陸時の安全間隔を満たしながら、運航コストを抑えつつ、できるだけ多くの便を飛行させることを目指す。そこで運航コストが最小となる軌道で離陸間隔を満たそうとすると、着陸間隔が十分に取れずコンフリクトが発生することが予想される。一方で着陸間隔を満たそうとすると、離陸時にコンフリクトが発生することが予想される。よって離陸、着陸ともに間隔を満たしながら、高密度交通流を形成するために、コスト最小の最適軌道から飛行時間の調整を行う。

飛行時間最適化におけるシミュレーション条件を Table 4-2 に示す。本解析では、交通流の便数を先に定め、交通流の空域総使用時間（フローコリドの導入時間に相当する）を最小化するように、飛行時間を変化させることで、高密度の交通流を形成する。

そこで交通流の便数の設定を行う。なお、設計変数の一つである、飛行時間調整量とは「最小コストでの飛行時間」からの飛行時間調整量である。アルゴリズムは、制約を考慮しながら、非線形関数を最小化する必要がある為、逐次二次計画法(SQP 法)を用いた。

Table 4-2 飛行時間最適化におけるシミュレーション条件

シミュレーション条件	
目的関数	交通流の空域総使用時間 $T[s]$
交通流の便数	n [便]
設計変数	$2n - 1$ [個] ・ 離陸間隔 $t_1 : n - 1$ [個] ・ 飛行時間調整量 $t_2 : n$ [個]
不等式制約条件	・ RECAT 離着陸間隔 ・ 各便の飛行時間 $>$ 最短飛行時間 ・ 各便の飛行時間 $<$ 最長飛行時間

また、計算フローを Fig. 4-3 に示す。まず、Table 3-2 に示した 9 パターンの機体より n [便] の飛行順をランダムに生成する。エアラインの意向により飛行順番は決まるため、本研究では、最初に定めた出発順番で固定するものとした。ただし、この時出発順番に対する到着順番の入れ替えは考慮するものとした。そして設計変数を与えることにより、飛行時間や到着順が定まる。計算の最後に、制約条件の確認を行い、SQP 法を用いて最適化を進める。

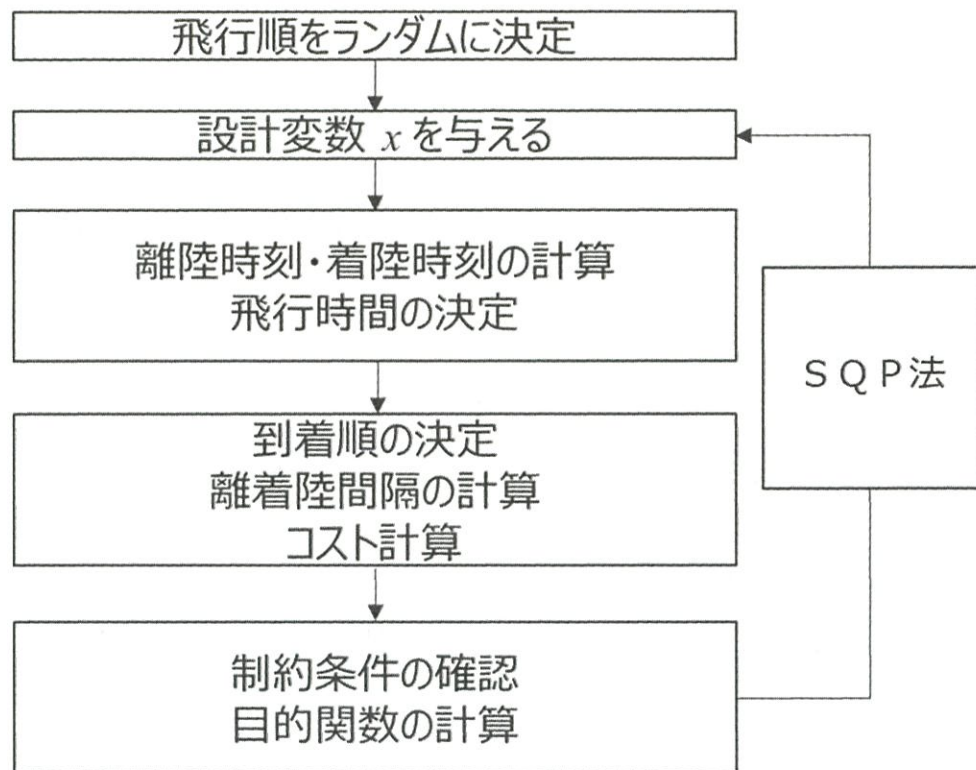


Fig. 4-3 計算フロー

初期値に関しては，局所解におちいることを避けるために，様々な初期値を与えるマルチスタート法を採用し，Table 4-3 のように与えた．なおランダム値を採用し 100[回]計算を行い，そのうち最も目的関数が小さい結果を，高密度交通流における空域総使用時間とした．

Table 4-3 マルチスタート法による初期値の与え方

初期値	
離陸間隔	68 [s]～150 [s]のうちのランダム値
飛行時間調整量	最短飛行時間～最短飛行時間同じコストとなるだけの 飛行時間調整量のうちからランダム値

4.3 結果

4.3.1 比較対象：総コスト最小交通流

比較対象として，飛行時間の最適化を行わずに，最小コスト飛行時間を使用した総コスト最小の交通流を適用する．便の出発順は高密度交通流と同じとして，RECAT の離着陸条件を与えながら，交通流の空域総使用時間を最小化した．

Table 4-4 比較対象の条件

シミュレーション条件	
目的関数	交通流の空域総使用時間 $T[s]$
交通流の便数	n [便]
設計変数	離陸間隔 $t_1 : n - 1$ [個]
制約条件	RECAT 離着陸間隔（不等式制約条件）

4.3.2 結果

4.2 章で述べた飛行時間最適化によって得た、高密度交通流の総コストおよび飛行密度を、飛行時間最適化していないときとで比較を行う。なお交通流の飛行順番によりコストや飛行密度が変化するため、今回の解析では、ランダムに 100[個]の交通流を作成した。

作成した交通流のフローコリドーにおける、各便のフローコリドー入口時刻および出口時刻の一例を Fig. 4-4 および Fig. 4-5 に示す。飛行時間最適化により、密な交通流を形成した。続いて離着陸間隔に関して着目する。シミュレーションにおける結果の間隔と RECAT の満たすべき間隔の一例を Fig. 4-6～Fig. 4-11 に示す。

総コスト最小の交通流の例を Fig. 4-6, Fig. 4-7 に示す。全てのケースで、始点もしくは終点のどちらか一方のみが最小間隔となる結果となった。

一方で、飛行時間最適化した場合の例を 2 例, Fig. 4-8～Fig. 4-11 に示す。フローコリドー終点での間隔が全ての便間で、RECAT の最小間隔となった。これは各便が必要とした飛行時間調整量に比べて、調整可能な飛行時間調整量が十分に大きかったためであると考えられる (Fig. 4-12)。始点では必ずしも全てのケースで最小間隔とはならなかった。最小間隔となった例を Fig. 4-8, ならなかった例を Fig. 4-10 に示した。最小間隔ではない箇所に関しては、到着順が最終に近い便で発生しており、この間隔が最小でなくても、終点間隔が最小となり、空域総使用時間の大小に影響しないためと考えられる。

そして飛行時間最適化により、Table 4-5 のように各便の飛行時間を抑えることが出来たため、空域総使用時間を大きく削減することができた。また、到着順番の入れ替えにより、各便の飛行時間の差を活かして、より高密度な交通度を形成することができた。

一方で、飛行時間最適化をしなかった場合は、飛行順番の入れ替えが発生しなかった。飛行順番の入れ替えが可能になるほど、各便の最小コスト飛行時間に関がなかったためである。そのため、最小コスト飛行時間が大きく異なる便間での間隔が疎となった。

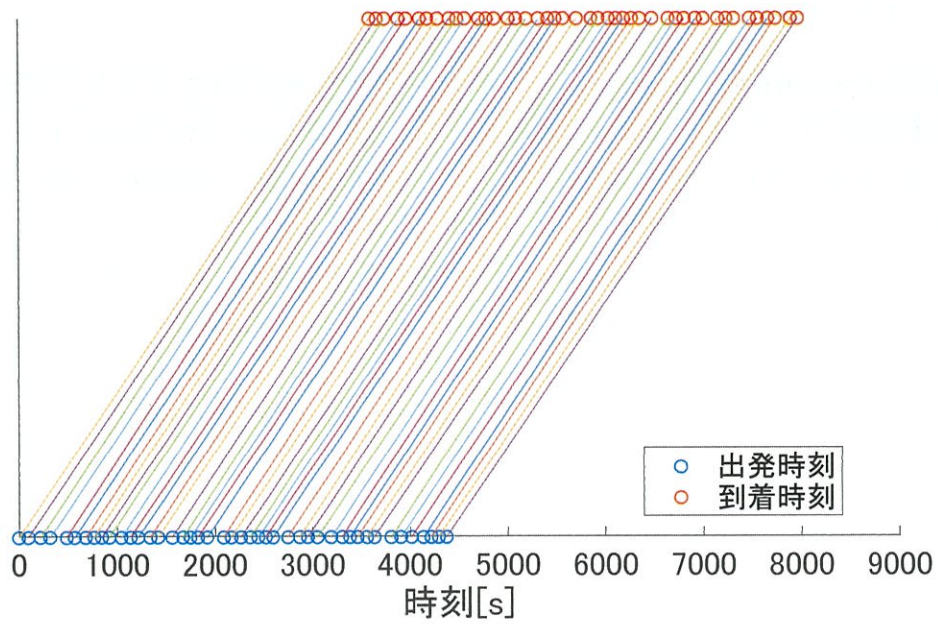


Fig. 4-4 総コスト最小時の交通流例

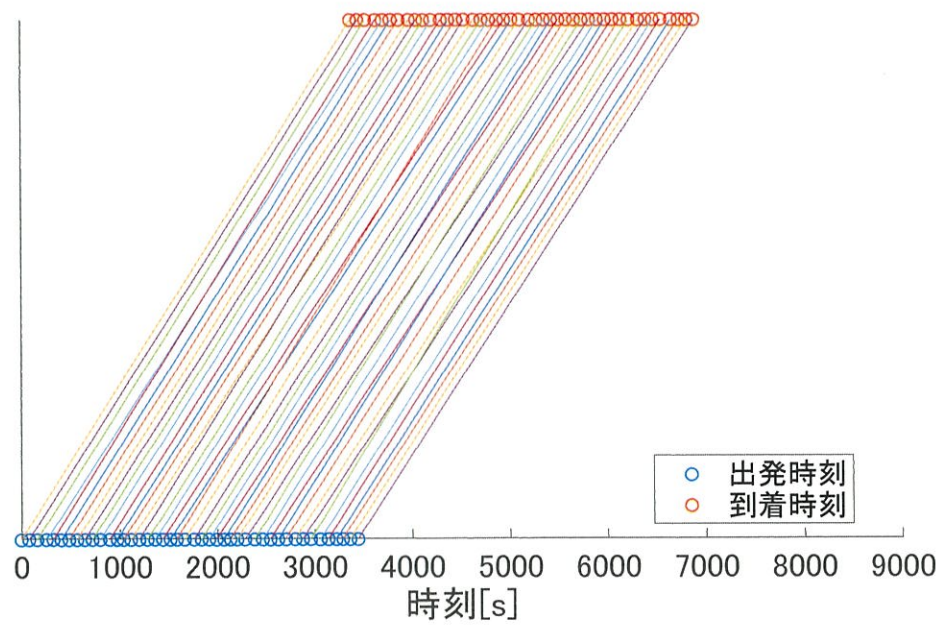


Fig. 4-5 飛行時間最適化による高密度交通流例

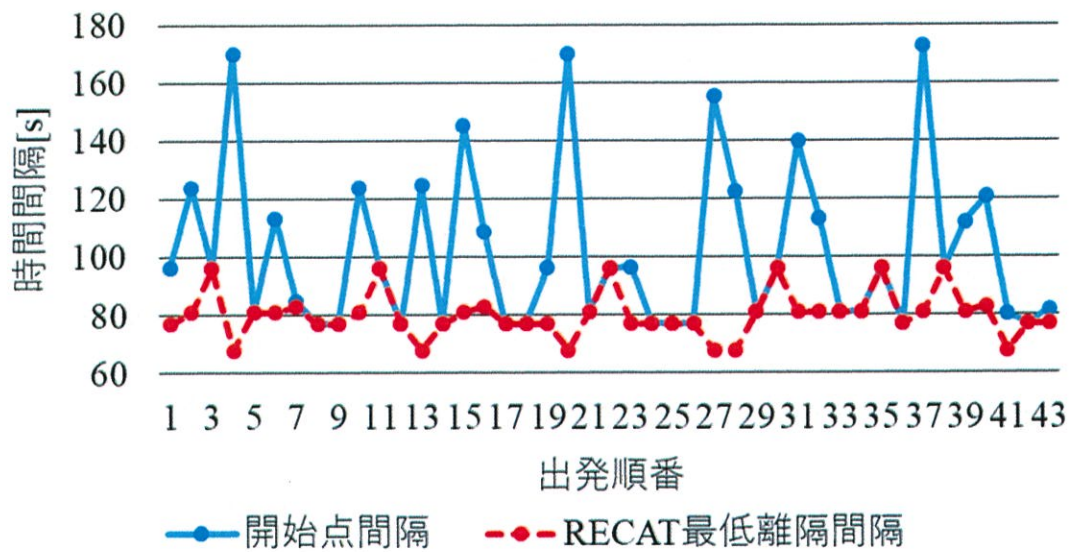


Fig. 4-6 後着機とのフローコリドー始点間隔例（最小コスト飛行時間）

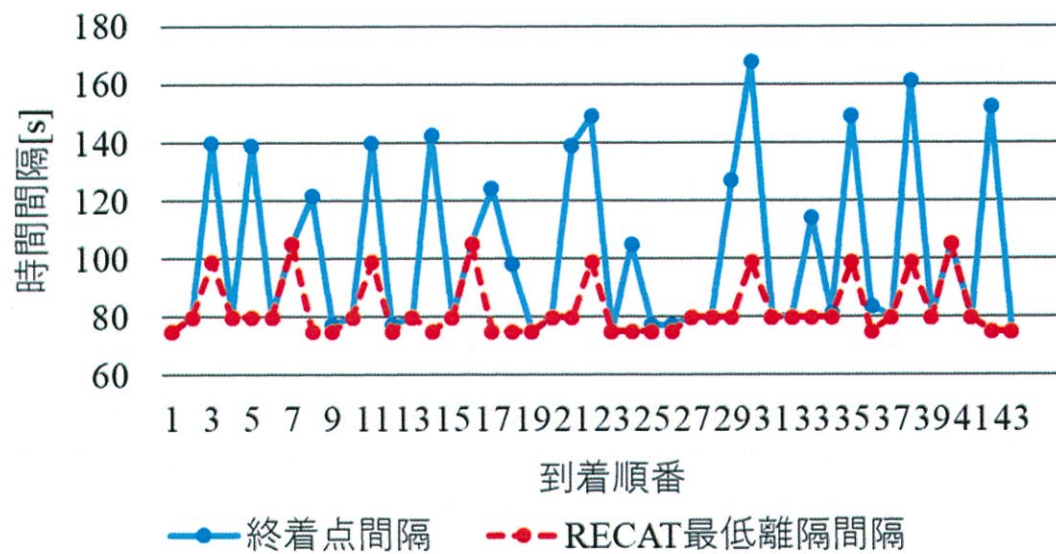


Fig. 4-7 後着機とのフローコリドー終点間隔例（最小コスト飛行時間）

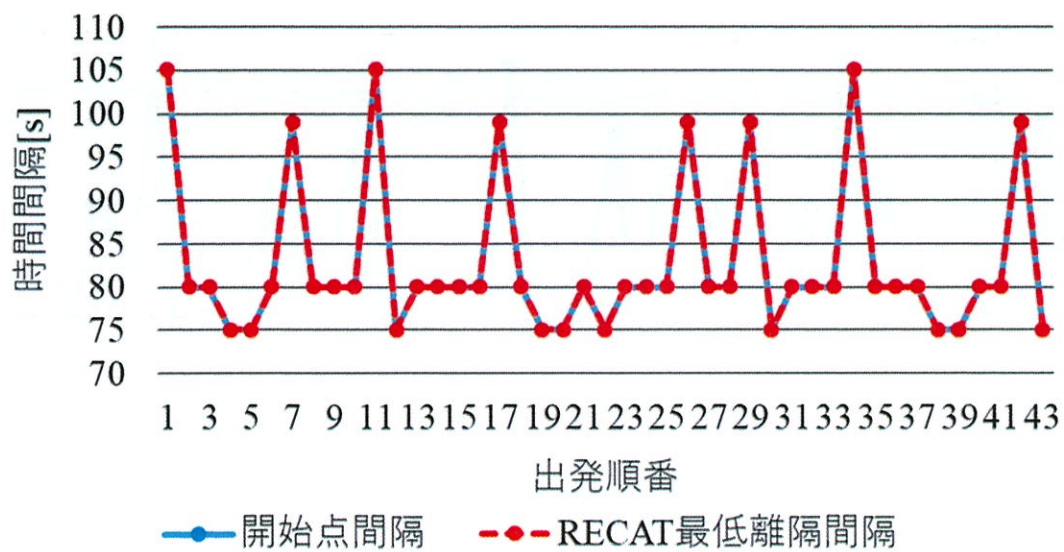


Fig. 4-8 後着機とのフローコリドー始点間隔例 (飛行時間最適化, 例1)

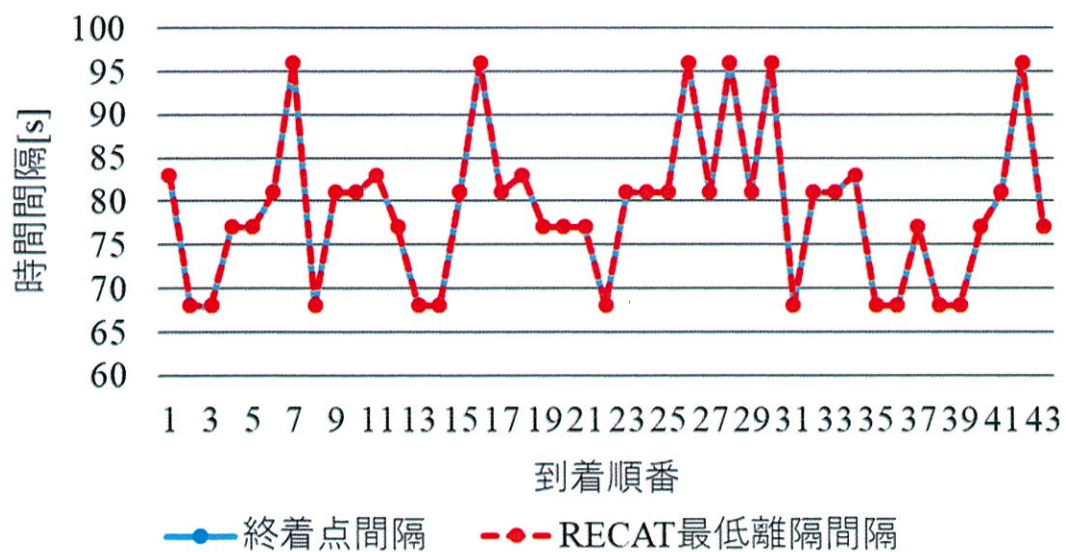


Fig. 4-9 後着機とのフローコリドー終点間隔例 (飛行時間最適化, 例1)

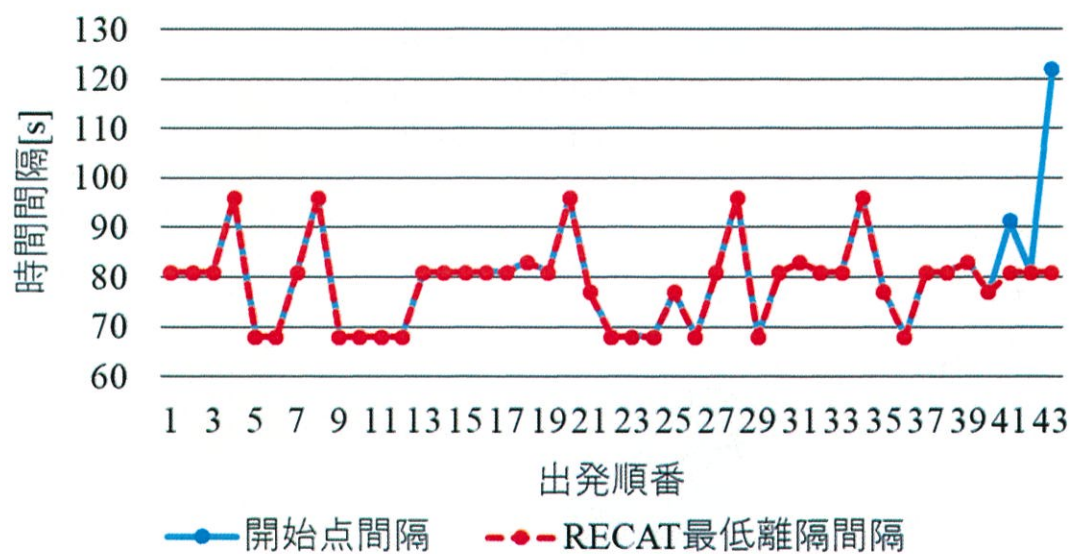


Fig. 4-10 後着機とのフローコリドー始点間隔例 (飛行時間最適化, 例2)

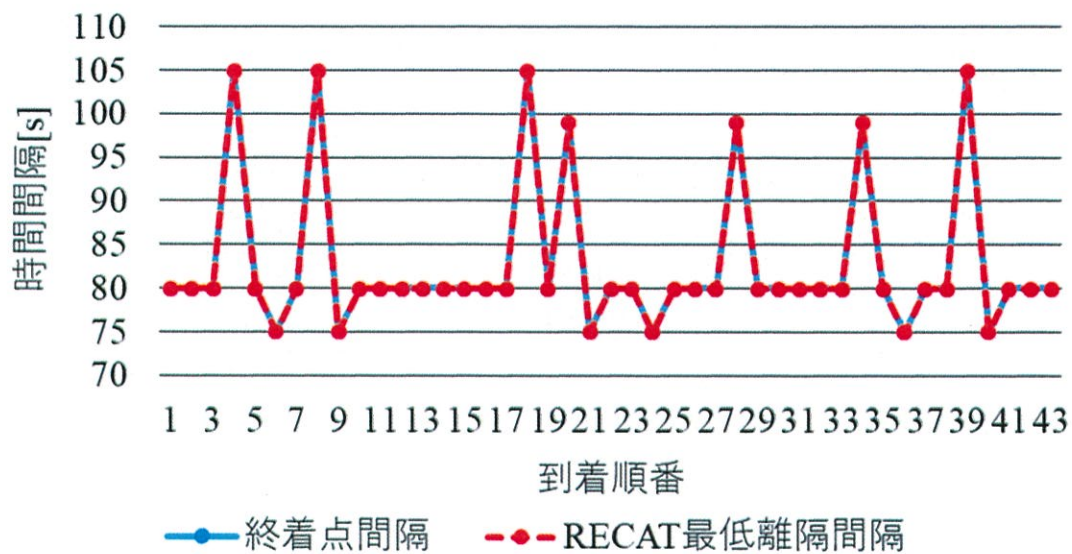


Fig. 4-11 後着機とのフローコリドー終点間隔例 (飛行時間最適化, 例2)

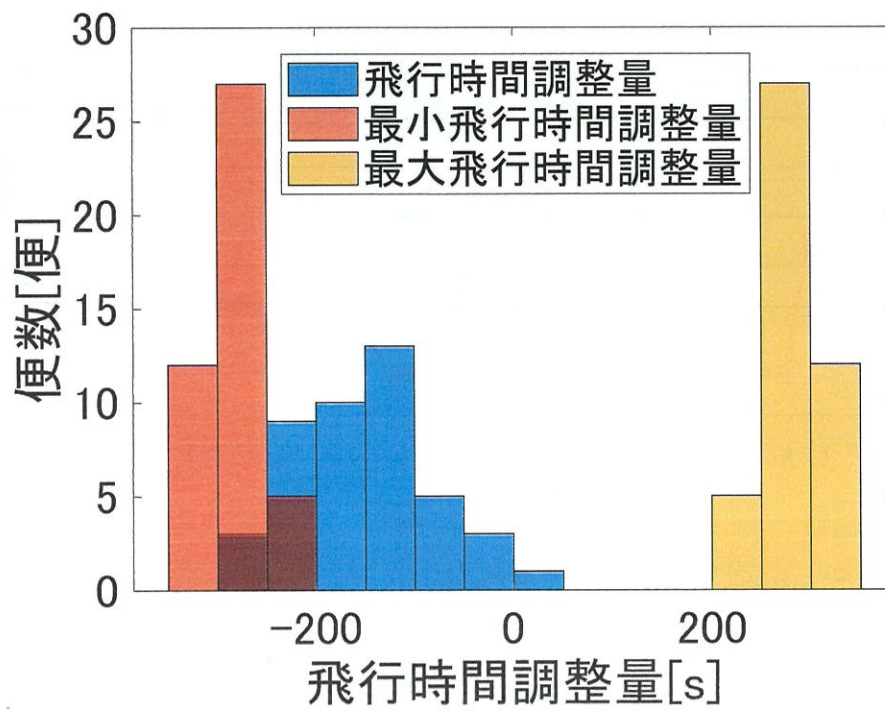


Fig. 4-12 飛行時間を最適化した交通流での飛行時間調整量のヒストグラム例

Table 4-5 交通流における各便の平均飛行時間例

	平均値
総コスト最小	3555
飛行時間最適化	3419

4.3.3 評価

今回検討を行った高密度交通流の評価として、100 回ランダムに作成した交通流の総運航コストおよび交通流の空域総使用時間を用いる。総運航コストおよび空域総使用時間の平均値、標準偏差、最大値、最小値を Table 4-6、Table 4-7 に、ヒストグラムを Fig. 4-13 に示した。平均値の増減量を比較すると、飛行時間の調整を行うことにより、総運航コストの上昇を 1.7 [%] に抑えながら、空域使用時間の平均値を 13.9 [%] 削減することができた (Fig. 4-6, Fig. 4-7)。また単位時間当たりの便数を考えると、運航可能便数を 16.1 [%] 増加できることが明らかとなった。運航コストに関しては、先行研究^[12]から、運航コスト最小化のフローコリドーを導入することにより、実運航に比べて運航コストは 10.0 [%] 削減することがわかっている。よって飛行時間最適化では、実軌道に比べて、8.3 [%] 削減することができるため、フローコリドーの便益は失われないことがわかる。

Table 4-6 交通流の総運航コスト [kg]

	平均値	標準偏差	最大値	最小値
総コスト最小	280196.2	11239.2	314335.2	236555.4
飛行時間最適化	285181.4	14161.2	325533.7	241357.6

Table 4-7 交通流の空域総使用時間 [s]

	平均値	標準偏差	最大値	最小値
総コスト最小	7984.7	94.3	8245.4	7724.5
飛行密度最密	6875.5	41.6	6966.3	6751.6

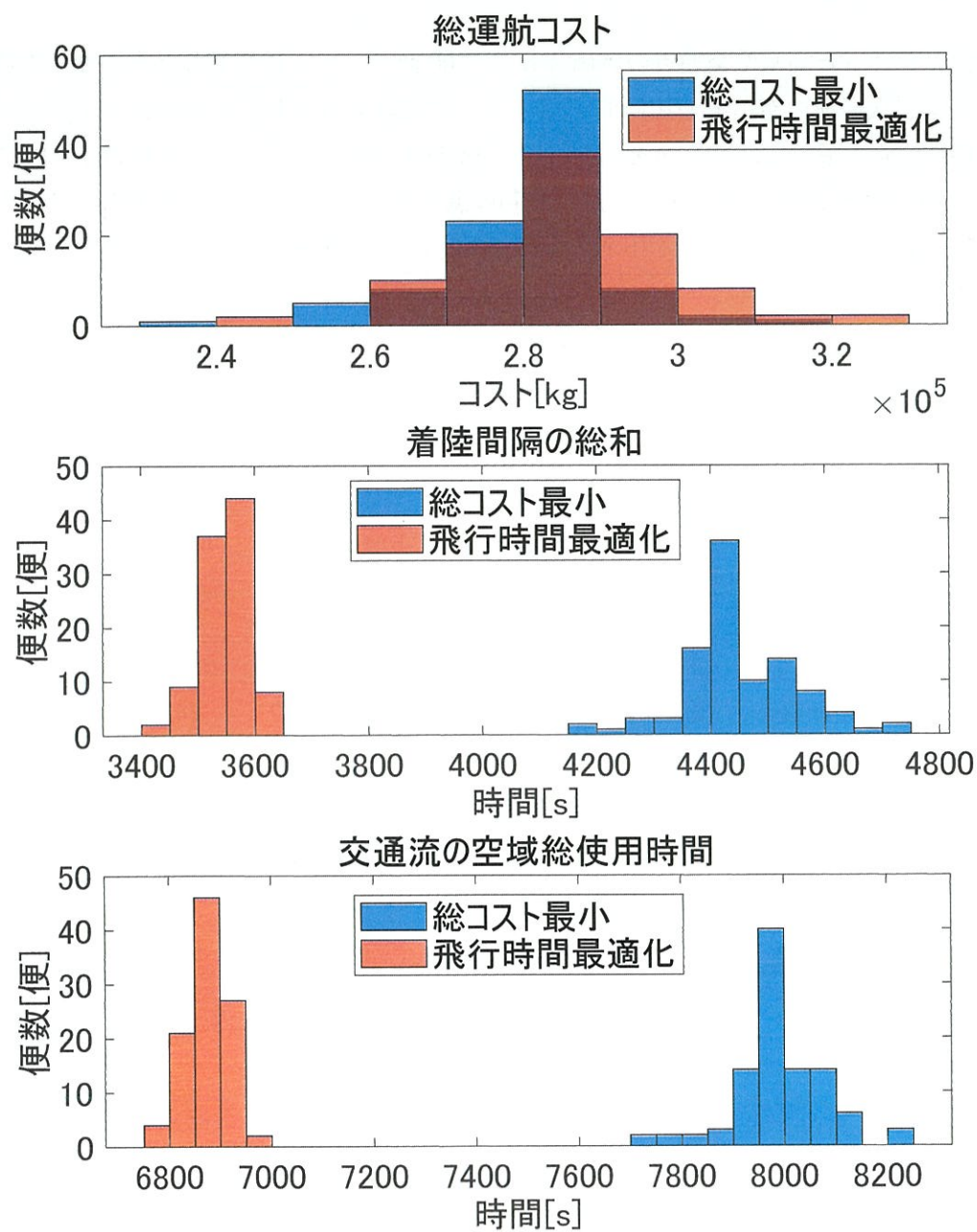


Fig. 4-13 交通流における各評価指標のヒストグラム

Table 4-8 総運航コストの平均値の変化

	増減量 [kg]	増減率 [%]
総運航コスト	4985.2	1.7

Table 4-9 空域総使用時間の平均値の変化

	増減量 [s]	増減率 [%]
空域総使用時間	-1109.2	-13.9

5. 結言

本研究では、混雑時間帯のみに福岡から東京に向かう 2 時間程度のフローコリドーを導入することを想定した解析を行い、十分な離着陸間隔を満たしながら、より多くの便の運航を可能にした。高密度交通流は、交通流の便数を定め、その空域総使用時間を最小化するように飛行時間を最適化することで作成した。評価には、交通流における総運航コストおよび飛行密度の平均増減量を用いた。比較対象には、各便が飛行時間の最適化を行わず各便の最小コスト飛行時間で飛行した、最小コスト交通流を使用した。

結果として、飛行時間の調整を行わない場合に比べて飛行時間の調整を行うことで、1.7[%]程度のコスト増加に抑えながら、運航可能便数を 16.1[%]増加できることが明らかとなった。各便の飛行時間を抑えると同時に、離着陸密度が最密状態となるように交通流が形成されたためである。また到着順番の入れ替えにより、各便の飛行時間の差を活かすことができた。そして先行研究と比較することで、1.7[%]のコスト増加分を加味しても、フローコリドーの内部での便益が得られることがわかった。

また、混雑時間帯にのみフローコリドーを設けることで、フローコリドーの外を飛ぶ機体の空域を使用する時間も減るため、フローコリドーのメリットを最大限に生かすことができると考えられる。

今後の課題として、交通流に対して総運航コストと飛行密度の両方を目的関数として考慮し最適化を行う検討が考えられる。

参考文献

- [1] D. Wing and W. Cotton, "Autonomous Flight Rules: A Concept for Self-Separation in U.S. Domestic Airspace," NASA TP-2011-217174, November 2011.
- [2] "minimum Aviation System performance standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast(ADS-B)," RTCA, DO-242a.
- [3] R. F. COOPERATIVE, "Principles of Operations for the Use of ASAS".
- [4] Yousefi and A. e. al., "High volume tube shaped sectors (HTS): A network of high-capacity ribbons connecting congested city pairs," IEEE/AIAA 23rd Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, UT, 2004.
- [5] H. Hering, "Air Traffic Freeway System for Europe," EEC Note No. 20/05, Nov. 2005..
- [6] 岡恵, "航空交通データの提供と 研究開発促進の取組について," 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所, 2019.
- [7] E. E. Center, "User Manual For the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9," 2011.
- [8] 小松原健史, 加来信之, "出発航空機から発する後方乱気流の観測," 電子航法研究所 研究発表会, 平成 17 年.
- [9] 吉原貴之, "後方乱気流管制間隔の詳細化と安全性及び導入効果の評価," 2019 年 6 月.
- [10] "OMDB - DUBAI / INTERNATIONAL - IMPLEMENTATION OF DUBAI RE-CATEGORISATION (RECAT) WAKE TURBULENCE SEPARATION SCHEME WITHIN DUBAI CTA," [Online]. Available: <https://www.gcaa.gov.ae/aip/current/AIRACs/2019-P04/html/eSUP/eSUP-2019-11-en-GB.html>. [Accessed 20 1 2020].
- [11] ICAO, "The Procedures for Air Navigation Services," Air Traffic Management (PANS-ATM), 2016.
- [12] 山本聡史, 諸岡康郎, 武市昇, 原田明德, "フローコリドーの導入が便益をもたらすための利用率の推定," 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 75, No. 2, 2019.

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究内容や方針に関して指導してくださいました武市昇教授に厚く御礼申し上げます。また、研究室の先輩方や同期、後輩の皆さんには、ゼミや日常からアドバイスを沢山いただき、非常に助かりました。この 2 年間有意義に過ごすことができ、自分自身にとってよりよいものとなりました。

最後に学生生活を温かく支援してくださいました両親に深く御礼申し上げます